

第4章

高速シリアル通信ボードの熱対策事例

―― FPGAの熱を見積もり，ヒートシンクとファンで逃がす

皆川 翔

ここでは，高速シリアル通信ボードで使われるFPGAの熱対策事例を紹介する．最近の高性能FPGAには，複数の高速シリアル・インターフェース・ブロックが搭載されている．これらのブロックは，数Gbpsという伝送速度で通信を実現できる反面，消費電力が比較的大きい．FPGAにより高速シリアル通信を行う場合は，消費電力をあらかじめ見積もり，十分な熱対策を行うことがたいせつである．（編集部）

最近の高性能FPGAは，CPUコアや積和演算器（DSPブロック），メモリ，高速シリアル通信のためのSerDes（serialization/deserialization）回路などを内蔵しています．また，90nmプロセスで製造される最新のFPGAでは，130nm時代のFPGAよりも高速化しています．

例えば，米国Xilinx社のVertex-4の場合，高速シリアル通信のためのSerDes回路が最大で20個も実装されている品種がラインナップされています．

本稿では，筆者がVirtex-4を搭載する高速シリアル通信ボードを使った設計を行った際に直面した消費電力と熱の問題を紹介し，その対策の道のりを解説します．

1 FPGAの消費電力と発熱問題

130nmプロセスで製造されるFPGAに比べ，90nmプロセスのFPGAの消費電力は比べものにならないくらい増大しています．この原因として，130nmプロセス技術よりも90nmプロセス技術はリーク電流が多いためと言われています．

LSIの消費電力が上がると，必然的に発熱も増えます．以前のFPGAなら，よほどの高速で動かさないかぎり，熱対策は必要ありませんでした．ところが90nm時代になるとそうもいきません．プリント基板設計を行う段階で，ターゲットとなるFPGAがどの程度の電力を消費するのか，それに付随して熱はどれくらい発生するのかを見積もり，適切な対策を施す必要があります．

● FPGAの消費電力を見積もる ―― Xilinx社の場合

Xilinx社のFPGAの中でも，90nmプロセスのVirtex-4ファミリの消費電力を見積もる際には，**図1**に示すような

表1　消費電力を見積もる条件

項　目	内　容
ターゲット・デバイス	XC4VFX60FF672
動作周波数	150MHz
論理ブロック使用率	50％（約12,000スライス）
内部メモリ使用率	50％（約2Mビット）
使用I/Oピン数	入力50本，出力50本
高速シリアル通信ブロック	6.25Gbpsで12個使用

表2　見積もり結果

記　号	機　能	消費電力（W）
LOGIC	論理ブロック	0.948
IO	I/Oブロック	0.092
BRAM	内蔵メモリ	1.009
DCM	クロック管理ブロック	0.325
MGT	高速シリアル通信ブロック	6.222

KeyWord
高速シリアル通信，FPGA，熱，ヒートシンク，SerDes，Virtex-4，消費電力見積もり，ヒート・パイプ，ジャンクション温度，放熱特性，熱抵抗

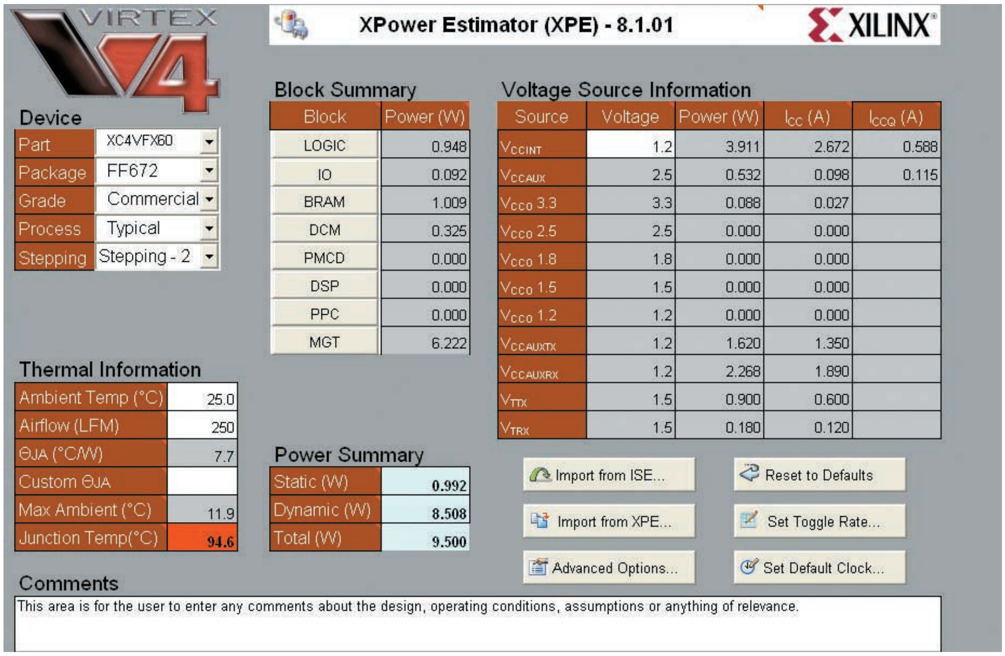


図1
Virtex-4用の消費電力見積もりシート
表計算ソフトウェアのExcelを原形とした見積もりシート．11ページのワークシートがあり，必要なパラメータを入力することで消費電力の見積もり値を算出してくれる．図は，さまざまな見積もり結果をまとめたサマリの画面

消費電力見積もりシートを使います．表計算ソフトウェアのExcelをベースとした見積もりシートです．11ページのワークシートがあり，必要なパラメータを入力すると消費電力の見積もり値を算出してくれます．

まず，**表1**の条件で消費電力を見積もってみました．すると，**表2**のように全体で9.5Wという今まで経験したことのない数値が出てしまいました．ここで注目すべきところは，高速シリアル通信ブロック部だけで6W以上の電力を消費していることです．これが熱になることを考えると，熱対策は必須と言えます．

見積もり結果と実測値でどの程度の誤差があるかについては，筆者は評価していません．しかし，消費電力は，電源回路の設計や熱対策のベースになるものです．消費電力が上がっている90nmプロセスのFPGAでは，見積もり結果にマージンを加えて設計する必要があると筆者は考えます(p.66のコラム「Virtex-4とVirtex-II Proの消費電力比較」を参照)．

● 熱を見積もる

Xilinx社の消費電力見積もりシートでは，周囲温度(T_a)と風量(LFM)による熱の見積もりが行えます．そこで，

- 周囲温度(Ambient Temp)：25℃
- 風量(LFM)　：250LFM(1.25m/s)

として見積もってみました．この結果，ジャンクション温度は94.6℃になりました(**図1**のThermal Information欄を参照)．これではXilinx社の規定するFPGAの動作温度範囲である0～85℃を大きく逸脱してしまいます．

2 熱対策を検討する

熱の発生を抑えるためには，消費電力を抑える必要があります．しかし今回は，高速シリアル通信を目的としているので，高速シリアル通信ブロック(MGT)を使わないわけにはいきません．必要な機能を使う以上，消費電力を大幅に抑えることはできません．そこで，放熱を考えることにしました．

放熱のイメージは「発熱体を冷やす」ことですが，物理的にいえば「放熱体の熱を空間へ移動させる」という解釈のほうがより具体的かもしれません．つまり熱交換をすばやく行えるしくみを作ればよいのです．

● 放熱の方法はさまざま

放熱については，ボードの構造や周囲温度の条件など，状況によってさまざまな冷却方法があります．今回は，ファンなどによる風とヒートシンクを主体とした放熱について検討しました．

- 強制空冷：FPGAのパッケージに直接風を当てて，熱交換の効率を上げる(**図2**)

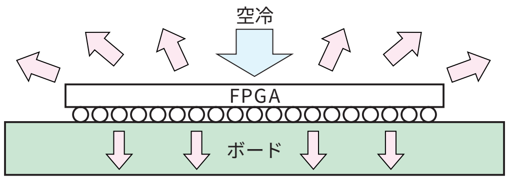


図2　強制空冷
FPGAのパッケージに直接風を当てて，熱交換の効率を上げる

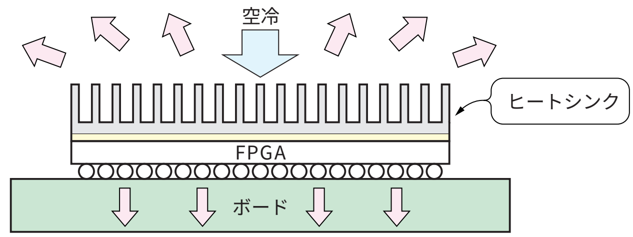
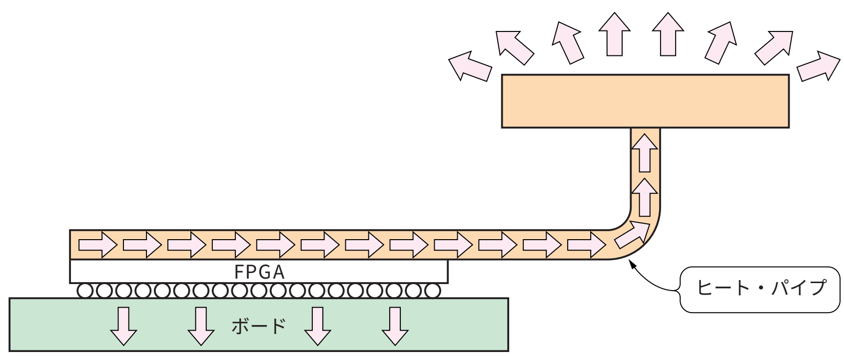


図3　強制空冷＋ヒートシンク
放熱面積を広くして風を当てることにより，熱交換率をさらに上げる

図4
ヒート・パイプ
熱の移動を効率良く行えるパイプを利用し，外部(遠方部)へ熱を移動させる．ヒート・パイプの性能しだいで放熱の効果が大きく左右される



- 強制空冷＋ヒートシンク：放熱面積を広くして，風を当てることにより，熱交換率をさらに上げる(**図3**)
- ヒート・パイプ：熱の移動を効率良く行えるパイプを利用し，外部(遠方部)へ熱を移動させる．ヒート・パイプの性能しだいで放熱の効果が大きく左右される(**図4**)

今回は，比較的容易に放熱効果を上げられる強制空冷とヒートシンクの組み合わせによる冷却方法(**図3**)を採用しました．

● とにかく風をあてて熱を逃がす

今回使用するFPGAは，「FF672」という672ピン・パッケージのフリップチップ品です．データシートには，**表3**のように，各パッケージごとに放熱特性が記されています．FF672の場合，無風時の熱抵抗は最大で15.7℃/Wです．例えば2Wの電力を消費する場合，31.4℃上昇することになります．

放熱特性をパッケージごとに見比べてみると，放熱の面積が広い多ピン・パッケージほど放熱の効率が高いことがわかります．例えば，FF672に比べ，同じフリップチップ品のFF1152は，無風時で約4℃/W，250LFM時で3.7℃/Wも熱抵抗が低いことがわかります．熱対策のためには，面積の大きな多ピン・パッケージを選択するのも有効な手段といえます(**図5**)．しかし，プリント基板への実装面積やコストを考慮すると，かならずしも多ピン・パッケージを選択できるとはかぎらないと思います．

そこでまず，FF672パッケージについて風を当てるだけで9.616Wの発熱を放熱できるかどうか検討してみます．

FF672パッケージ放熱特性を見ると，750LFMの風量が得られた場合，1W当たりの放熱特性は7.6℃になっています．すなわち，9.616W発生時は，

$$7.6\ [℃/W] \times 9.616\ [W] = 73.0816\ [℃]$$

となり，温度上昇は約73℃という結果になります．

LSIは，動作時の周囲温度を基準にパッケージの温度上昇があったときに，ジャンクション温度を超えないようにして使わなければなりません(**図6**)．

$$\text{ジャンクション温度}(T_j) > \text{熱抵抗}(\theta_{ja}) \times \text{消費電力}(P) + \text{周囲温度}(T_a)$$

FPGAを使う場合，熱抵抗θ_{ja}とジャンクション温度T_jの情報は，データシートから得ます．また，消費電力Pは，FPGAベンダが提供する消費電力見積もりツールを活用して入手します．周囲温度T_aには，実際に使用する環境の温度を適用します．

表3
Virtex-4シリーズのパッケージ放熱特性表

FF672の場合，無風時の熱抵抗は最大で15.7℃/W．例えば2Wの電力を消費する場合は，31.4℃も上昇する．FF672に比べて，同じフリップチップ・タイプのFF1152なら，無風時で約4℃/W，250LFM時で3.7℃/Wも熱抵抗が低い．大きなパッケージは熱対策には有効である

パッケージ	θ_{ja} 無風（最大）	θ_{ja} 無風（標準）	θ_{ja} 無風（最小）	θ_{ja} 250LFM（標準）	θ_{ja} 500LFM（標準）	θ_{ja} 750LFM（標準）	θ_{jc}（標準）
	℃/W	℃/W	℃/W	℃/W	℃/W	℃/W	℃/W
CP132	72.4	67.4	62.3	62.8	60.4	58.5	13.4
CPG132	62.3	62.3	62.3	58.7	56.4	54.1	11.0
CPG56	66.0	66.0	66.0	59.8	57.8	56.4	14.9
CS144	34.0	34.0	34.0	25.9	23.9	23.2	2.8
CS280	30.5	30.5	30.5	25.0	23.1	23.2	0.8
CS48	45.0	45.0	45.0	―	―	―	5.0
CSG144	34.0	34.0	34.0	26.0	23.9	23.2	2.8
CSG280	30.5	30.5	30.5	25.0	23.1	23.2	2.6
CSG48	45.0	45.0	45.0	―	―	―	5.0
DD8	115.9	108.4	94.0	89.0	72.8	59.6	8.0
FF1148	11.0	10.9	10.9	6.7	5.2	4.4	0.5
FF1152	11.5	10.9	10.5	6.8	5.3	4.4	0.5
FF1513	10.0	9.7	9.5	7.0	6.0	5.7	0.6
FF1517	11.4	10.9	10.4	6.9	5.4	4.7	0.5
FF1704	9.0	8.7	8.6	5.5	4.3	3.7	0.4
FF668	14.3	13.4	12.4	9.5	7.8	6.9	0.8
FF672	15.7	14.6	13.8	10.5	8.6	7.6	0.7
FF896	11.8	11.6	11.4	7.6	6.3	5.4	0.6
FFG1152	11.2	11.2	11.2	7.0	5.5	4.7	0.6
FG1156	14.7	13.5	12.6	10.4	9.3	8.5	2.0
FG256	32.7	25.6	16.5	21.7	20.3	19.6	3.7
FG320	25.7	24.3	23.0	20.7	19.3	18.7	5.1
FG324	39.3	32.5	26.9	23.2	20.8	19.9	4.4
FG456	23.5	19.7	16.5	15.6	14.2	13.6	2.0
FG676	18.1	16.8	16.6	13.3	12.1	11.7	2.0

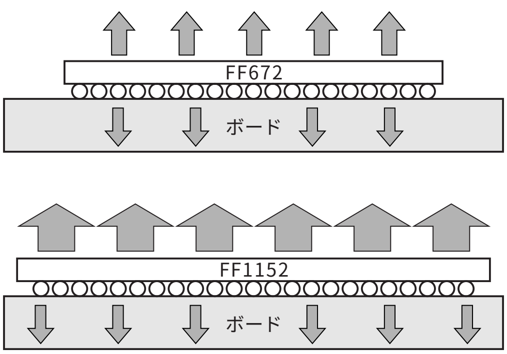


図5　パッケージと放熱

熱対策では，面積の大きな多ピン・パッケージを選択するのも有効な手段といえる

ここで，750LFM，35℃の環境で使用すると仮定した場合，

Xilinx社のFPGAのT_j ＞
（FF672の熱抵抗）×消費電力＋周囲温度

$T_j > 7.6 \times 9.616 + 35$

$T_j > 108$

という結果となります．Xilinx社のFPGAのジャンクション温度T_jは最大で85℃なので，パッケージに強制空冷を行うだけの放熱対策では不十分であるという結論に至りました．

なお，実際にはFPGAからプリント基板へも熱が伝わります．しかし今回は，プリント基板による放熱を考慮していません．

● 風だけでは不足

それではもっとたくさんの風を当てたらどうなるのでしょうか？

残念ながらXilinx社のデータシートには，750LFM以上の風を当てた場合の熱抵抗値が記載されていません．パッケージの特性がわからなければ，合否を判定することはできません．

あくまでも個人的な意見ですが，データシートに記載されていないということは，これ以上の風を当てても効率の良い熱交換は不可能なのだと考えられます．

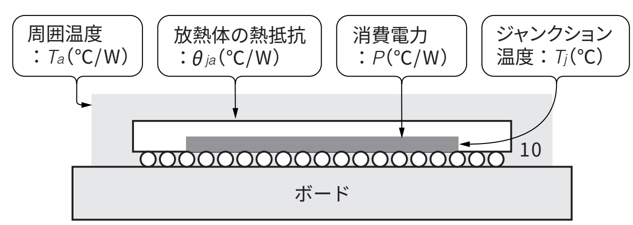


図6　LSIの熱を考えるためのパラメータ

FPGAを使う場合，熱抵抗θ_{ja}とジャンクション温度T_jは，FPGAのデータシートから情報を得る．また，消費電力Pは，FPGAベンダが提供する消費電力見積もりツールを使って入手する．周囲温度T_aには，実際に使用する環境の温度を適用する．ここでは，プリント基板に伝わる熱は考慮していない

❸ ヒートシンクによる放熱

周囲温度（T_a）が30℃を超える環境においては，いかに



放熱の効率を上げるかがポイントになってきます．前項で述べたとおり，FF672の熱抵抗をそのまま利用するだけでは，周囲温度の厳しい環境下では簡単にジャンクション温度を超えてしまいます．

もっと効率良く放熱するためには，放熱面積の広い放熱体を使用すればよいわけです．しかし，パッケージを大きくすることができないのであれば，ヒートシンクを使用して放熱面積をかせぐことにより，放熱特性を上げます．

● ヒートシンクにはピン・タイプとフィン・タイプがある

ヒートシンクは，メーカによってさまざまな形状/材料のものが用意されています．周囲環境に応じて，最適な形状のヒートシンクを選定します．

1）ピン・タイプ

ベース・プレートの上に，剣山のように細い棒が垂直に立っているタイプです．微風状態でも効率良く放熱してくれます．風量があまり得られない場所で効力を発揮します．

2）フィン・タイプ

ベース・プレートの上に，羽のようなものを垂直に並べた形状です（**図7**）．形状にもよりますが，ある程度の風量を必要とします．フィンとフィンの間が密集すればするほど圧力損失が上がるため，ヒートシンクが受ける風量と風向を厳密に計算しなくてはなりません．

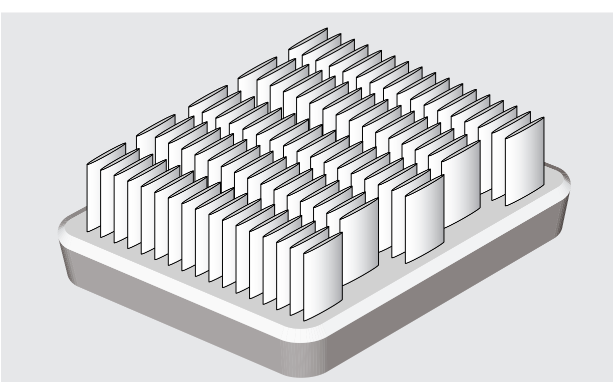


図7　フィン・タイプのヒートシンク
フィンの形状，厚み，密接度によって放熱特性と圧力損失が大きく変わる．フィンを薄くして密集させると放熱面積が増えるため効果が大きいが，圧力損失も増えるため大きな風量を必要とする

● パッケージとヒートシンクの間の熱伝導保証

パッケージの上にヒートシンクがかぶさることにより，パッケージは熱伝導体となるわけですが，パッケージとヒートシンクの間には，かならず隙間（エア・ギャップ）が発生します．エア・ギャップが発生すると，パッケージはヒートシンクに対して高効率で熱を伝えることができません．むしろヒートシンクに熱を伝えられないために，逃げ場を失った熱がパッケージにこもってしまい，かえって放熱効率が悪くなってしまいます．

このような問題を避けるためには，パッケージとヒートシンクの間に熱伝導シートやグリスを使用してエア・ギャップを埋めます．熱伝導シートを使用することにより，ヒートシンクへ熱を伝えることが保証されるので，これにより机上の計算精度を大幅に上げることができます．

● ヒートシンクによる放熱効果

今回は，ピン・タイプのヒートシンクを選定しました．

LSIのパッケージ上にヒートシンクを取り付けると，熱抵抗の計算方法が変わります．今まで放熱体として計算していたパッケージは，ヒートシンクがかぶさることにより，放熱体から熱伝導体という概念に置き換わります．そして，ヒートシンクが放熱体となり，ヒートシンクの熱抵抗をもとに計算することになります（**図8**）．

FPGAのパッケージのみで放熱する場合と比べると，

- 伝熱体（シートやグリス）の熱抵抗 θ_{js} ［℃/W］
- 伝熱体（FPGAパッケージ）の熱抵抗 θ_{jc} ［℃/W］

を追加して考えることになります．今回は，**表4**の条件で放熱特性を再計算してみます．

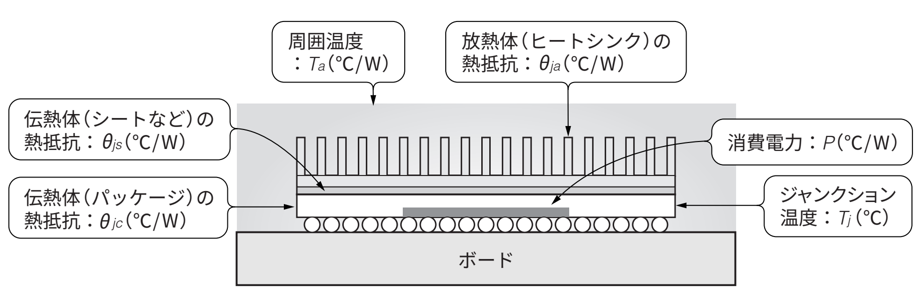
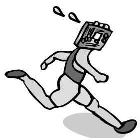
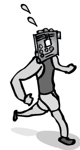


図8
ヒートシンクを使った放熱を考えるためのパラメータ
ヒートシンクは放熱体，パッケージは熱伝導体として考える

ジャンクション温度(T_j)
　＞(熱抵抗θ_{js}×消費電力P)
　　＋(熱抵抗θ_{jc}×消費電力P)
　　＋(熱抵抗θ_{ja}×消費電力P)
　　＋周囲温度(T_a)

この式に実際の数値をあてはめてみると,

$$T_j > (0.05 \times 9.616) + (0.7 \times 9.616) + (2 \times 9.616) + 35$$

$$T_j > 61.444$$

となり,FPGAのパッケージ,熱伝導シート,ヒートシンクすべての熱抵抗を加味した計算でも,Xilinx社のFPGAのジャンクション温度を超えることはなくなりました.

ただし,あくまでも机上の計算なので,あとどれだけマージンを確保すればよいのかという問題が残ります.今回は,ジャンクション温度に達するまで約23℃のマージンを確保できています.しかし,回路の仕様変更などによる消費電力の増加分を想定しておくことも必要かもしれません.

消費電力見積もりツールで算出された消費電力については信用するしかありませんが,実測値と異なるケースは多々あります.とりわけ放熱対策については,風量の調整やヒートシンクのタイプを変えることができるよう,ハードウェア構成を柔軟に設計しておいたほうがよいと思います.

表4　ヒートシンクによる放熱の条件

項　目	変数	パラメータ	備　考
伝熱シート	θ_{js}	0.05℃/W	―
FPGAパッケージ	θ_{jc}	0.7℃/W	Xilinx社のデータシートに基づく
周囲温度	T_a	35℃	―
ヒートシンク	θ_{ja}	2℃/W	2m/sの風量が得られることを前提とする
消費電力	P	9.616W	―
ジャンクション温度	T_j	85℃	Xilinx社のデータシートに基づく

4 まとめ

5～6年前のFPGAでも,CPLDや同等機能のLSIに比べれば消費電力は多かったと記憶しています.しかし,筆者の場合は,「放熱」という考えを持つことなく活用できました.その後,プロセス技術の微細化と1チップ化が進み,高速に動作する機能ブロックがハード・マクロとしてFPGAに搭載されるようになってから,消費電力は格段に上がってしまいました.FPGAベンダは,リーク電流を極力小さくしたり,アーキテクチャをくふうすることで消費電力を抑えようとしているようです.しかし,90nm品は今までのプロセス品とは違い,消費電力が圧倒的に大きくなります.今後FPGAベンダには消費電力を抑える努力を継続していただきたいのですが,それと同時に,放熱対策についての情報提供を率先して行っていただきたいと思いました.

ヒートシンクにはさまざまな特性があります.「なんとなく付けてみる」という安易な姿勢では,逆に放熱の効果が悪くなってしまいます.どの形状はどのような特性をあわせ持つのか,机上で十分に検討,見積もりを行ってから最適なヒートシンクを選択するのが,失敗のない方法だと思います.

参考・引用*文献

(1) Xilinx;Virtex-4用消費電力見積もりシート.
(2) Xilinx;Virtex-II Pro用消費電力見積もりシート.
(3) Xilinx;Virtex-4 ユーザー ガイド.
(4) アルファ;ヒートシンクWSシリーズ3次元イメージ図.

みながわ・かける

コラム　Virtex-4とVirtex-Ⅱ Proの消費電力比較

本文中で示したVirtex-4の消費電力見積もりに用いた条件で，Virtex-Ⅱ Proの消費電力を見積もってみました．Virtex-4とまったく同じ機能のVirtex-Ⅱ Pro製品はありませんが，XC4VFX60FF672-10と構造が近いXC2VP40FF672-10をターゲットにしました．

Virtex-Ⅱ Proの消費電力見積もりは，**図A-1**のようなWebサイトのページから行います．結果を**表A-1**に示します．

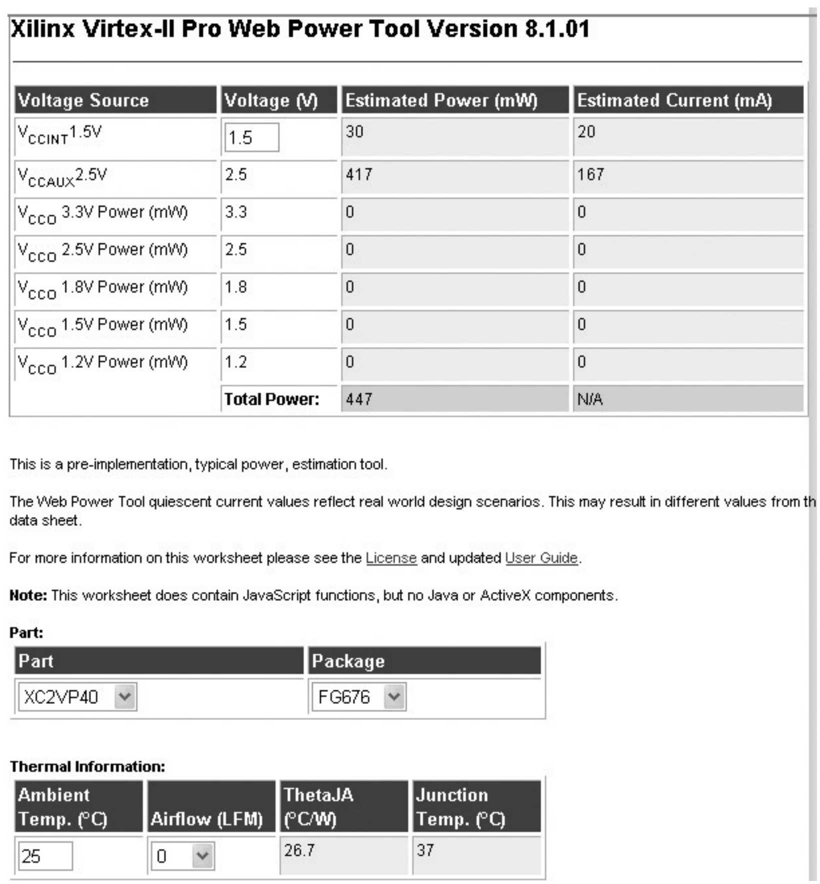
Virtex-4と比べてVirtex-Ⅱ Proのほうが消費電力が低いことがわかります．ただし，Virtex-Ⅱ Proでは6.25Gbpsの通信を行えないので，3.125Gbpsで見積もっています．

試しに，3.125Gbps通信を行うものとしてVirtex-4の消費電力見積もりを実施してみました．結果は7.951Wとなり，Virtex-Ⅱ Proと比べて約2Wほど消費電力が大きいようです．

表A-1　見積もり結果

記　号	電　圧	消費電力
V_{CCINT}	1.5V	343mW
V_{CCAUX}	2.5V	570mW
$V_{CCAUXRX}$	2.5V	1080mW
$V_{CCAUXTX}$	2.5V	1560mW
V_{TRX}	2.5V	324mW
V_{TTX}	2.5V	324mW

記　号	電　圧	消費電力
V_{CCINT}	1.5V	4865mW
V_{CCAUX}	2.5V	987mW
V_{CCO}	3.3V	80mW
合　計	—	5.932W


Xilinx Virtex-II Pro Web Power Tool Version 8.1.01

Voltage Source	Voltage (V)	Estimated Power (mW)	Estimated Current (mA)
V_{CCINT} 1.5V	1.5	30	20
V_{CCAUX} 2.5V	2.5	417	167
V_{CCO} 3.3V Power (mW)	3.3	0	0
V_{CCO} 2.5V Power (mW)	2.5	0	0
V_{CCO} 1.8V Power (mW)	1.8	0	0
V_{CCO} 1.5V Power (mW)	1.5	0	0
V_{CCO} 1.2V Power (mW)	1.2	0	0
	Total Power:	447	N/A

This is a pre-implementation, typical power, estimation tool.

The Web Power Tool quiescent current values reflect real world design scenarios. This may result in different values from th data sheet.

For more information on this worksheet please see the License and updated User Guide.

Note: This worksheet does contain JavaScript functions, but no Java or ActiveX components.

Part:

Part	Package
XC2VP40	FG676

Thermal Information:

Ambient Temp. (°C)	Airflow (LFM)	ThetaJA (°C/W)	Junction Temp. (°C)
25	0	26.7	37

図A-1
Virtex-Ⅱ Pro用の消費電力見積もりシート
Webサイトでパラメータを入力し，消費電力を見積もることができる（http://www.xilinx.com/cgi-bin/power_tool/power_Virtex2p/）